



Sistemas de isolamento e revestimento de Alternadores

Eduardo Cassiano Carlin
WEG
Brasil
cassiano@weg.net

Marcelo Defant dos Santos
WEG
Brasil
marcelods@weg.net

1. INTRODUÇÃO

O presente guia tem por objetivo apresentar os critérios, processos e materiais utilizados na proteção dos sistemas de isolamento e revestimento WEG para as diferentes aplicações (ambientes). O escopo deste guia compreende alternadores de corrente alternada, com construção aberta e de baixa tensão com enrolamentos randômicos.

2. CONCEITOS

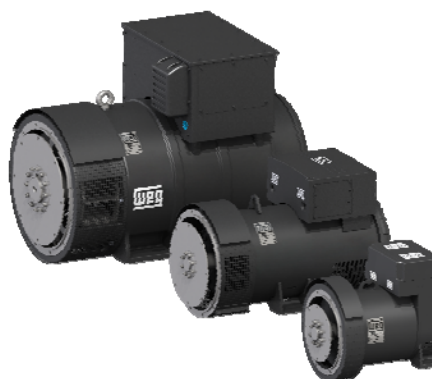
É importante destacar algumas definições de termos que são apresentados em normas utilizadas pela WEG e que estão associados aos materiais isolantes e os sistemas de isolamento.

2.1 Índice Térmico (IEC 60216-1): É um valor numérico da temperatura em graus Celsius derivado da relação do envelhecimento térmico a um tempo de 20.000 horas (ou outro tempo especificado);

2.2 Classe térmica (IEC 60034-18-1): Temperatura à qual um sistema de isolamento é aplicável, conforme definido pelas classes térmica na IEC 60085 e como usado na IEC 60505;

2.3 Material isolante elétrico (IEC 60505): Material com condutividade elétrica desprezível, usado para separar partes condutoras em diferentes potenciais elétricos;

2.4 Sistema de isolamento (IEC 60034-18-1): Estrutura de isolamento contendo um ou mais materiais isolantes elétricos, aplicados sobre partes condutoras, empregado em máquinas elétricas rotativas.



Em máquinas elétricas girantes, tratando-se das partes ativas, não é correto aplicar o conceito de material isolante ou índice térmico. Aplica-se o conceito de classe térmica e sistema de isolamento. É importante salientar que os materiais e sistemas de isolamento utilizados nos alternadores WEG estão certificados conforme UL1446 – File E236096.

Os equipamentos utilizados na impregnação dos componentes possuem processo automatizado com controle do tempo dos ciclos de banho da resina e de medição de temperatura através de sensores. A utilização destes equipamentos garante o correto preenchimento de resina e proteção das bobinas.

A WEG possui diversos tipos de processos de impregnação, destacando a utilização da tecnologia de impregnação por VPI (Vacuum Pressure Impregnation) e de outros processos, como impregnação por imersão e/ou gotejamento.

3. DESCRIÇÃO DOS POSSÍVEIS AMBIENTES DE APLICAÇÃO E MATERIAIS EMPREGADOS

Os alternadores WEG são utilizados em diversas aplicações. Desde as mais simples, como acionamentos por tomada de força, utilizando tratores em pequenas propriedades, até as mais complexas, como operação em paralelo, sistemas de transferência em rampa e aplicações remotas em navios e plataformas de petróleo.

As principais máquinas acionantes são os motores de combustão interna à diesel, gás, biogás, biodiesel e etanol. Também estão aptos a operar com turbinas a vapor, gás ou hidráulicas.



Operam nos regimes de serviço de emergência, horário de ponta ou serviço contínuo, em diversas áreas, tais como: industrial, comercial, naval, construção civil, telecomunicações, mineração, condomínios, irrigação, hospitais, data center, rural, aeroportos, entre outros.

Devido à grande diversidade de aplicações em que os alternadores WEG são utilizados, torna-se necessária a definição das principais características dos possíveis ambientes empregados:

3.1. Ambiente Normal: É caracterizado por apresentar uma umidade relativa média inferior a 60% e, conseqüentemente, não apresentar nenhum elemento agravante de corrosão possibilitando assim o emprego de materiais metálicos sem restrições ao ambiente de aplicação;

3.2. Ambiente Úmido: Apresenta umidade relativa média superior a 60%, onde inicia-se o processo lento de corrosão dos materiais. Quando a umidade relativa média ultrapassa 70% o processo de corrosão se torna acelerado. Isso se deve pelo fato deste ambiente possuir partículas úmidas (H_2O) suspensas na atmosfera, que podem se depositar na superfície do material e acelerar o processo de corrosão. Neste ambiente não é indicado o uso de material em aço carbono sem revestimento. A recomendação mínima para este ambiente é a aplicação de materiais metálicos com revestimento galvanizado ou pintado;

3.3. Ambiente Marítimo: Apresenta características mais complexas em relação aos ambientes apresentados anteriormente, pois, além da umidade também há presença da água do mar, que apresenta uma solução de sais contendo matéria orgânica viva, gases dissolvidos e matéria orgânica em decomposição. A água do mar é constituída por cloreto de sódio ($NaCl$), cloreto de magnésio ($MgCl_2$), sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e sulfato de cálcio ($CaSO_4$). Neste ambiente os ataques são realizados principalmente pela ação do cloreto de sódio ($NaCl$), que por ser um eletrólito forte, quando depositado na superfície do material, aumenta a condutividade do mesmo acelerando o mecanismo eletroquímico de corrosão. O ambiente marítimo ainda pode ser subdividido em 2 categorias:

- **Onshore:** Localizado na zona costeira onde ocorre um sistema cíclico de condensações, sem ou com pouca salinidade e com alto nível de corrosão.

- **Offshore:** Localizados em pleno mar, onde se ocorre um sistema cíclico de condensações, combinado com a forte presença de salinidade e de raios UV, e com alto nível de corrosão.

3.4. Ambientes contaminados: É muito comum a aplicação de produtos em ambientes contaminados por agentes externos e/ou gerados no próprio ambiente. Exemplo de contaminantes:

- **Amônia (NH_3):** Frequentemente encontrado em ambiente da indústria química, nas fábricas de ácido nítrico (HNO_3) e de ureia (CH_4N_2O), que utilizam amônia como matéria prima. O princípio de ataque se dá pela combinação da amônia com o óxido de enxofre (SO_2), formando sais compostos de eletrólitos fortes. Pode ser utilizada na indústria para refino de petróleo, insumo na fabricação de produtos farmacêuticos e como gás refrigerante nos processos de resfriamento de câmaras frigoríficas e ar condicionado. Na agricultura também é utilizada para fabricação de fertilizantes e pode ser produzida naturalmente através da decomposição de materiais orgânicos (esterco).
- **Dióxido e Trióxido de Enxofre (SO_2 e SO_3):** Normalmente encontrado em ambientes industriais, em razão das indústrias usarem óleos combustíveis contendo parcelas de enxofre. O gás SO_2 lançado na atmosfera pode ser oxidado a SO_3 . Esta reação é catalisada por óxidos metálicos (como o Fe_2O_3) ou por ação fotoquímica, onde a luz ativa o SO_2 permitindo sua oxidação a SO_3 , estes reagem com a umidade do ambiente e formam ácido sulfuroso e ácido sulfúrico, sendo estes fortes elementos de corrosão para o material. Na atmosfera, o SO_2 se liga ao oxigênio, produzindo SO_3 , onde tais substâncias acumuladas nas nuvens se precipitam sob a forma chuva ácida. O SO_2 ainda é utilizado na indústria de alimentos e bebidas como agente antibacteriano, desinfetante, antisséptico, e conservador de produtos.
- **Ácido sulfúrico (H_2SO_4):** É um ácido mineral forte, solúvel na água em qualquer concentração. O ácido sulfúrico tem várias aplicações industriais e é produzido em quantidade maior do que qualquer outra substância (só perde em quantidade para a água). Pode ser empregado na fabricação de outros ácidos, fertilizantes, medicamentos, no processamento de minérios e de efluentes líquidos e no refino de petróleo.



O ácido sulfúrico reage com a maioria dos metais (ferro, alumínio, zinco, manganês e níquel), com a formação de gás hidrogênio e de sulfato do metal correspondente. Estanho e o cobre só sofrem reação quando em contato com ácido quente concentrado. O chumbo e o tungstênio são inertes ao ácido sulfúrico.

- **Sulfeto de Hidrogênio (H₂S):** Também conhecido por gás sulfídrico, é um composto corrosivo, venenoso e gasoso no seu estado natural. É encontrado no gás sintético do carvão, no gás natural e em produtos da indústria de petróleo, papel, biogás que contém enxofre. Possui odor semelhante a ovos podres e sua combinação com ar é explosiva, eles queimam com uma chama azul para formar dióxido de enxofre (SO₂) e água.

Quando em solução aquosa é chamado de ácido sulfídrico e torna-se altamente corrosivo quando em contato com a superfície do aço, formando um produto de corrosão de sulfeto ferroso (FeS). Também reage com outros metais, como cobre, prata e chumbo.

Para ambientes sujeitos a contaminação de materiais metálicos é necessária a utilização de elementos de fixação em aço inoxidável.

Os alternadores ainda podem ser empregados em ambientes abrigados e desabrigados:

- **Abrigado:** Condição em que o produto fica protegido dentro um invólucro ou uma construção, isento de contato direto com agentes externos (água, poeira, contaminantes, gases e intempéries provenientes da natureza). São considerados abrigados ambientes como: grupos geradores carenados, grupos geradores abertos em casa de máquinas, etc. É comum neste ambiente a aplicação de produtos com grau de proteção IP21 e IP23.
- **Desabrigado:** Condição em que o produto fica desprotegido parcialmente ou integralmente, normalmente a céu aberto (ao tempo), podendo ter contato direto com agentes externos (água, poeira, contaminantes, gases e intempéries provenientes da natureza). A aplicação de produtos com grau de proteção IP21 e IP23 ambiente não é recomendada.

4. SISTEMAS DE ISOLAÇÃO

A WEG oferece ao mercado três graus de isolamento do produto. A seguir são apresentadas as descrições, locais típicos de aplicação e a especificação da proteção para cada grau de isolamento.

4.1. Grau 1 - INDUSTRIAL

- **Descrição:** Utilizado para aplicações industriais, em meio ambiente normal e onde a umidade relativa média não ultrapassa 95%, com temperatura ambiente inferior a 40°C, abrigados, isentos de contaminantes a materiais metálicos, com presença de salinidade e ventos moderados (velocidade média anual abaixo de 5 m/s).
- **Locais típicos de aplicação:** Indústrias, hospitais, residências, estabelecimentos comerciais, fazendas, e eventos em cidades litorâneas.
- **Especificação da proteção:**
 - Impregnação VPI para o estator principal;
 - Pintura dos enrolamentos do estator principal com uma camada de tinta cinza epóxi poliamida;
 - Impregnação por imersão para rotor principal;
 - Pintura do núcleo magnético do estator da excitatriz com uma camada de tinta cinza epóxi poliamida;
 - Pintura dos enrolamentos do estator e rotor da excitatriz com uma camada de tinta cinza epóxi poliamida para a linha AG10;
 - Impregnação por gotejamento inclinado do estator e rotor da excitatriz;

4.2. Grau 2 – NAVAL

- **Descrição:** Utilizados para aplicações em ambientes marítimos (onshore ou offshore), onde a umidade relativa média pode ultrapassar 95%, com temperatura ambiente inferior a 40°C, abrigados, isentos de contaminantes a materiais metálicos, com presença de salinidade e ventos fortes (velocidade média anual acima de 5 m/s).
- **Locais típicos de aplicação:** Portos, embarcações e plataformas de petróleo.
- **Especificação da proteção:**
 - Pintura do núcleo magnético do estator e rotor principal com uma camada de tinta cinza epóxi poliamida;
 - Pintura dos enrolamentos do estator e rotor principal com uma camada de tinta cinza epóxi poliamida;
 - Impregnação VPI para estator principal;
 - Impregnação por imersão para rotor principal;
 - Pintura dos enrolamentos e núcleo magnético do estator e rotor da excitatriz



com uma camada de tinta cinza epóxi poliâmida;

Impregnação por gotejamento inclinado do estator e rotor da excitatriz;

Obs.: Recomenda-se o uso de resistência de aquecimento.

4.3. Grau 3 - ESPECIAL

▪ **Descrição:** Utilizados para aplicações em ambientes marítimos (onshore ou offshore) e em ambientes contaminados (presença de corrosão e abrasão), onde a umidade relativa média pode ultrapassar 95%, com temperatura ambiente inferior a 40°C, abrigados ou desabrigados, onde há presença de salinidade, contaminantes a materiais metálicos e ventos fortes (velocidade média anual acima de 5 m/s).

▪ **Locais típicos de aplicação:** Florestas tropicais, britadores e mineração em geral, indústrias químicas, áreas sujeitas a inundações e ilhas com maresia extrema.

▪ **Especificação da proteção:**

Pintura do núcleo magnético do estator e rotor principal com uma camada de tinta cinza epóxi poliâmida;

Pintura dos enrolamentos e núcleo magnético do estator e rotor principal com uma camada de tinta cinza epóxi poliâmida e uma camada de tinta anti-tracking vermelha;

Impregnação VPI para estator principal;

Impregnação por imersão no rotor principal;

Aplicação de resina entre camadas do rotor principal;

Utilização de duplo isolamento nas ranhuras do estator e rotor principal;

Utilização de estecas para fechamento das ranhuras do estator principal;

Pintura do núcleo magnético do estator e rotor da excitatriz com uma camada de tinta cinza epóxi poliâmida;

Pintura dos enrolamentos e núcleo magnético do estator e rotor da excitatriz com uma camada de tinta cinza epóxi poliâmida e com uma camada de tinta anti-tracking vermelha;

Derating na potência nominal do alternador.

Obs.: Recomenda-se o uso de resistência de aquecimento.

5. REVESTIMENTO DE COMPONENTES EXTERNOS

Para os alternadores WEG basicamente são utilizados três tipos de especificações para pintura dos componentes externos:

5.1. Plano de Pintura 207A: Utilizado para aplicações industriais abrigadas, em ambientes úmidos com umidade relativa média inferior a 95%, com presença de salinidade e isentos de contaminantes nocivos a materiais metálicos. Recomendado para utilização em alternadores aplicados com o sistema de isolamento Grau1.

5.2. Plano de Pintura 212P: Utilizado para aplicações em ambientes marítimos com umidade relativa média superior a 95%, expostos a presença de salinidade e isentos de contaminantes que causam corrosão de materiais metálicos. Garante exposição a intempéries, devido à alta resistência da tinta Poliuretano neste ambiente, mantendo cor e brilho. Recomendado para utilização em alternadores aplicados com o sistema de isolamento Grau2.

5.3. Plano de Pintura 212E: Utilizado para aplicações em ambientes marítimos com umidade relativa média superior a 95%, expostos a presença de salinidade e em ambientes com alta concentração de produtos químicos ou que contenham contaminantes que causam a corrosão de materiais metálicos. Recomendado para utilização em alternadores aplicados com o sistema isolamento Grau3.

6. ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Nos alternadores WEG podem ser empregados dois tipos de materiais para elementos de fixação:

6.1. Aço carbono: Materiais de revestimento galvanizado, aplicados em ambientes com umidade relativa média inferior a 95%, isentos de salinidade e contaminantes que causam corrosão de materiais metálicos. Recomendado para utilização em alternadores aplicados com o sistema de isolamento Grau1. Nestes casos, os alternadores são fornecidos com todos os elementos de fixação externos pintados, garantindo maior longevidade dos materiais.

6.2. Aço inoxidável: Utilizado para aplicações em ambientes marítimos com umidade relativa média superior a 95% e em ambientes que contêm contaminantes que causam a corrosão de materiais metálicos. Recomendado para utilização em alternadores aplicados com os sistemas de isolamento Grau2 e Grau3.



7. CARACTERÍSTICAS PARA CADA SISTEMA DE ISOLAÇÃO

As principais características dos sistemas de proteção são apresentadas na tabela abaixo, a fim de auxiliar na identificação do ambiente e escolha do processo mais adequado.

Tabela 1: Utilização dos alternadores conforme Grau de isolação

ISOLAÇÃO	Grau1	Grau2	Grau3
Aplicação	INDUSTRIAL	NAVAL	ESPECIAL
Local de uso	Litoral Abrigado	Embarcado	Abrasão & Corrosão
Grau de proteção	IP21 ou IP23	IP21 ou IP23	IP23
Norma de referência	IEC 60721-3-3	IEC 60721-3-3	IEC 60721-3-3
Umidade relativa	UR ≤ 95%	UR ≤ 100%	UR ≤ 100%
	Condensação possível	Com condensação	Projeção partículas de água
Salinidade	Presença de sal	Nevoa salina	Com maresia
Concentração do sal	Até 1g/m ³	Até 10g/m ³	Até 30g/m ³
Abrasividade	Partículas de pó	Partículas de poeira	Partículas de areia
Pacote Chapas	Sem pintura	Com pintura	Com pintura

8. POSSÍVEIS COMBINAÇÕES DOS SISTEMAS DE ISOLAÇÃO, ELEMENTOS DE FIXAÇÃO E PLANO DE PINTURA

As possíveis combinações para seleção dos sistemas de isolação, elementos de fixação e planos de pintura de acordo com o ambiente aplicado podem ser visualizadas na Figura 1:

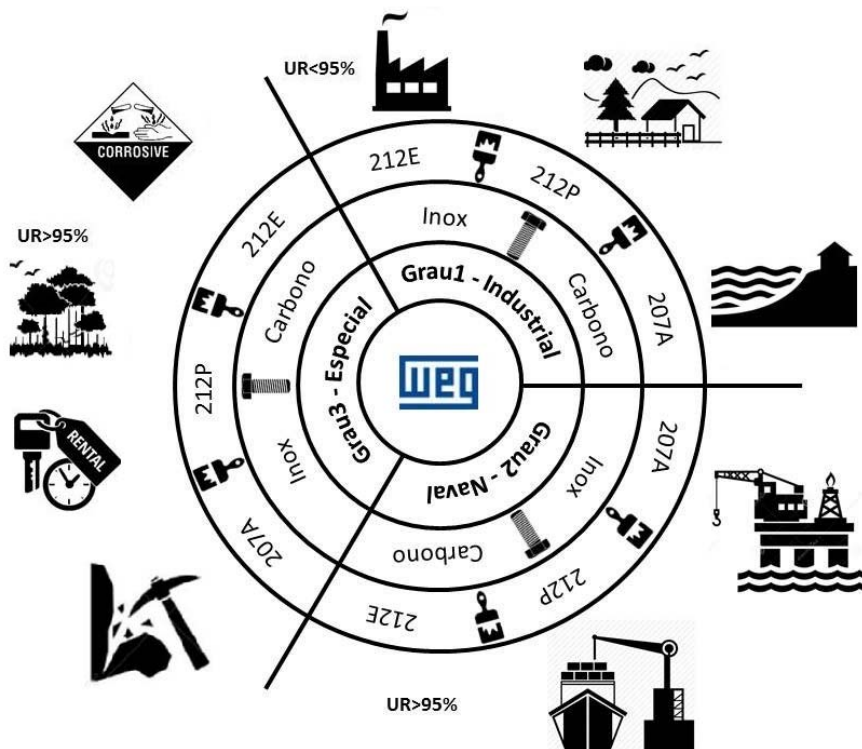


Figura 1: Guia de seleção do sistema de proteção, elementos de fixação e plano de pintura conforme o ambiente

9. CONCLUSÃO

A WEG disponibiliza três diferentes sistemas de isolação para seus alternadores de corrente alternada com construção aberta, sendo cada um deles para uma aplicação em especial. Assim, conhecer a aplicação e os materiais utilizados na proteção de cada Grau de alternadores disponibilizados pela WEG é de suma importância ao cliente, que poderá fazer a melhor escolha conforme sua necessidade.

Portanto, esse material busca abranger essa visão simplificada, sugerindo o melhor ambiente de aplicação para cada sistema de isolação.